Serial Attached SCSIとの共存を考慮したPCI Expressシステム設計

――最大性能を引き出すためのバッファ，エラー制御，レイアウトの考えかた

Tim Symons，Linus Wong

PCI Expressは一つの物理リンク当たり2.5Gbpsの，Serial Attached SCSIは3Gbpsのデータ伝送速度に対応しています．この両者を組み合わせることで，システム設計者はストレージ・システム全体の性能を引き上げることができます．両技術ともに高い拡張性を持つため，将来，要求されるであろう性能改善にも対応できると期待されています．ここでは，PCI ExpressとSerial Attached SCSIの特徴を説明しながら，両者が共存するシステムに最大の帯域幅を持たせる方法を解説します．（筆者）

データ・センタなどのストレージ・システムでは，20年以上にもわたってハード・ディスク装置の接続方法として，おもにパラレルSCSIバスが使用されてきました．SCSIのみならず，ほかのパラレル・インターフェース技術は，いまだに広範囲にわたって利用されていますし，今日存在する多くの企業向けシステムの要求性能に対応するように進化し続けています．

しかし，クロック・スキューやクロストーク・ノイズの増大といった重要な技術的課題を考えると，今後，次のような要求を強く求められるようになるでしょう．

- データ・インテグリティの（データ品質）ロバスト（堅ろう）性
- システム性能の高速化
- ストレージの拡張性・柔軟性の向上
- システムの小型化設計

しかし，こうした要求に対応するのに，今日のパラレル技術を改変しながら利用し続けることは，コスト面から考えて現実的であるとは言えません．

こうした背景から，Serial Attached SCSI（SAS）やPCI Expressといったシリアル・アーキテクチャが現れました．これらのシリアル・アーキテクチャはデータ信号にクロックのタイミングを埋め込んだ（セルフ・クロッキング方式）信号ペアを用いることで，パラレル・アーキテクチャと比べてデバイスのパスウェイごとに，より広い帯域幅を提供します．さらに，クロック速度を容易に引き上げることができます．また，データの複数ビットを一つのパケットにまとめて装置間の転送を行います．パケットは，パラレル方式の場合と比べて最大30倍も高速に伝送されます．

また，パラレル・バスのマルチドロップ（共有バス型）アーキテクチャに対して，シリアル・バスは専用線を用いて装置間を接続するポイント・ツー・ポイント（1対1）のネットワークを構築できます．ポイント・ツー・ポイントのバス・アーキテクチャは，以下のような利点をもたらします．

- 装置ごとに最大帯域幅を利用する
- アービトレーション（調停）を行う必要がない
- 伝送遅延が低減する
- ホットプラグやホットスワップに対応したシステムの構築が容易になる

● 一つのシステムに約16,000台のデバイスを接続可能

パラレルSCSIインターフェースの後継規格であるSerial Attached SCSIは，従来のSCSIによってすでに証明されている企業ストレージ・システムのための性能や拡張性，信頼性をさらに向上させています．Serial Attached SCSIの特徴は，例えば一つのシステム（SASドメイン）当たり最大16,256台のデバイスと接続可能であるとか，伝送速度が最大3Gbpsのポイント・ツー・ポイント接続が可能になるといった，今日，主流のストレージ・システムにはない多くの機能を実現できることです．第1世代のSerial Attached SCSIのスループットは3Gbpsですが，今後，技

術や応用分野の進化に合わせて最大12Gbpsの速度に対応する予定です．

Serial Attached SCSIの備える全二重通信のポイント・ツー・ポイント接続の特徴は，複数のイニシエータ（ホスト・デバイス）とハード・ディスク装置などのターゲット・デバイスの間の接続を同時に機能させることができる（複数のデバイスが並行動作する）点です．イニシエータとターゲット・デバイスの間では一度に双方向のデータ転送を行うため，リンク（双方向の差動信号対の束）の帯域幅を2倍にして利用できることになります．

Serial Attached SCSIは，エクスパンダ（ホストと周辺機器の中継用装置）を介して接続することで，システムのアクセス能力と接続性を向上させています．イニシエータとエクスパンダの接続には，ナロー・ポート（narrow port）とワイド・ポート（wide port）という二つの方法があります（**図1**）．ナロー・ポートでは1ポートは一つの物理リンク（双方向の差動信号線ペア．つまり，4本のワイヤ）に，ワイド・ポートでは1ポートが複数の物理リンクに対応します．ワイド・ポートの場合，八つのSerial Attached SCSIリンクによって，24Gbpsまで帯域幅を向上できます．

エクスパンダとは，一つまたは複数のSerial Attached SCSIのイニシエータを最大128ポート注1に接続するための装置です．エクスパンダには，ファンアウト・エクスパンダとエッジ・エクスパンダの2種類があります．一つのSASドメインにファンアウト・エクスパンダは一つだけ存在しますが，エッジ・エクスパンダは複数設置できます（**図2**）．複数のエッジ・エクスパンダを相互に接続して一つのデバイスのグループを作れます．これらのグループをファンアウト・エクスパンダに接続することで，SASドメインが構築されるのです．

例えば，ファンアウト・エクスパンダには，128台のSerial Attached SCSIデバイスを接続できます．このとき，ナロー・ポート，ワイド・ポートにかかわらず，イニシエータ，Serial Attached SCSIまたはSerial ATAのハード・ディスク装置，エッジ・エクスパンダなどのデバイスと接続できます．ファンアウト・エクスパンダとエッジ・エクスパンダは，ほかのイニシエータやハード・ディスク装置につながれることで，順次接続ノードを追加していきます．Serial Attached SCSIで定められたSMP（SCSI Management Protocol）が，こうしたトポロジにおけるポイント・ツー・ポイント接続を管理します．

このようにして拡張性を向上させることによって，企業ストレージ向けのトポロジ，すなわち，自動フェイルオーバ機能注2や負荷分散を実現するための複数ノードのクラスタ構成に容易に対応できるのです．

また，パラレルSCSIと同じように，Serial Attached SCSIはキュー（待ち行列）の深さが256のコマンド・キューイング注3を備えています．これによって，ヘッド・オブ・キューやアウト・オブ・オーダ実行（キューに入ってきた順序と異なる順序でコマンドを実行する）といったデータ処理を行えます．キューイング機能は，システムがインターフェース内でコマンドの再要求や再優先順位づけを可能にするという点で，企業向けのアプリケーションにおいてはとても重要です．

注1：ハード・ディスク装置だけでなく，別のイニシエータやエクスパンダのポートを含む．
注2：稼働中のシステムが故障しても，予備のシステムが処理を続行することで，信頼性を高めること．
注3：ターゲット・デバイスにおいて，あらかじめ複数のコマンドを待ち行列に入れておいて順番に処理を行う機能．

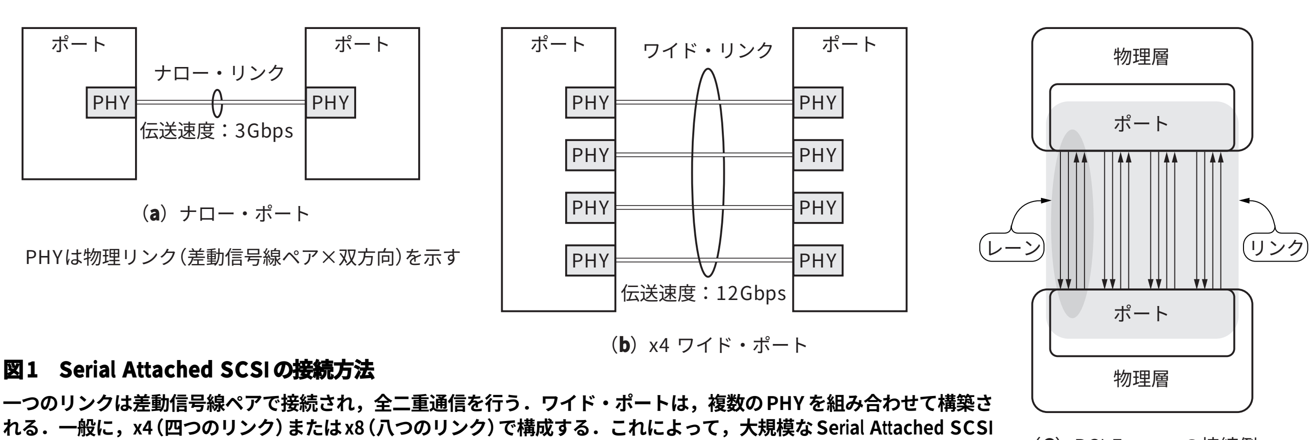


図1 Serial Attached SCSIの接続方法
一つのリンクは差動信号線ペアで接続され，全二重通信を行う．ワイド・ポートは，複数のPHYを組み合わせて構築される．一般に，x4（四つのリンク）またはx8（八つのリンク）で構成する．これによって，大規模なSerial Attached SCSIトポロジに対する帯域幅の要求に対応できる．なお，比較のために（c）にはPCI Expressの接続例を示した．

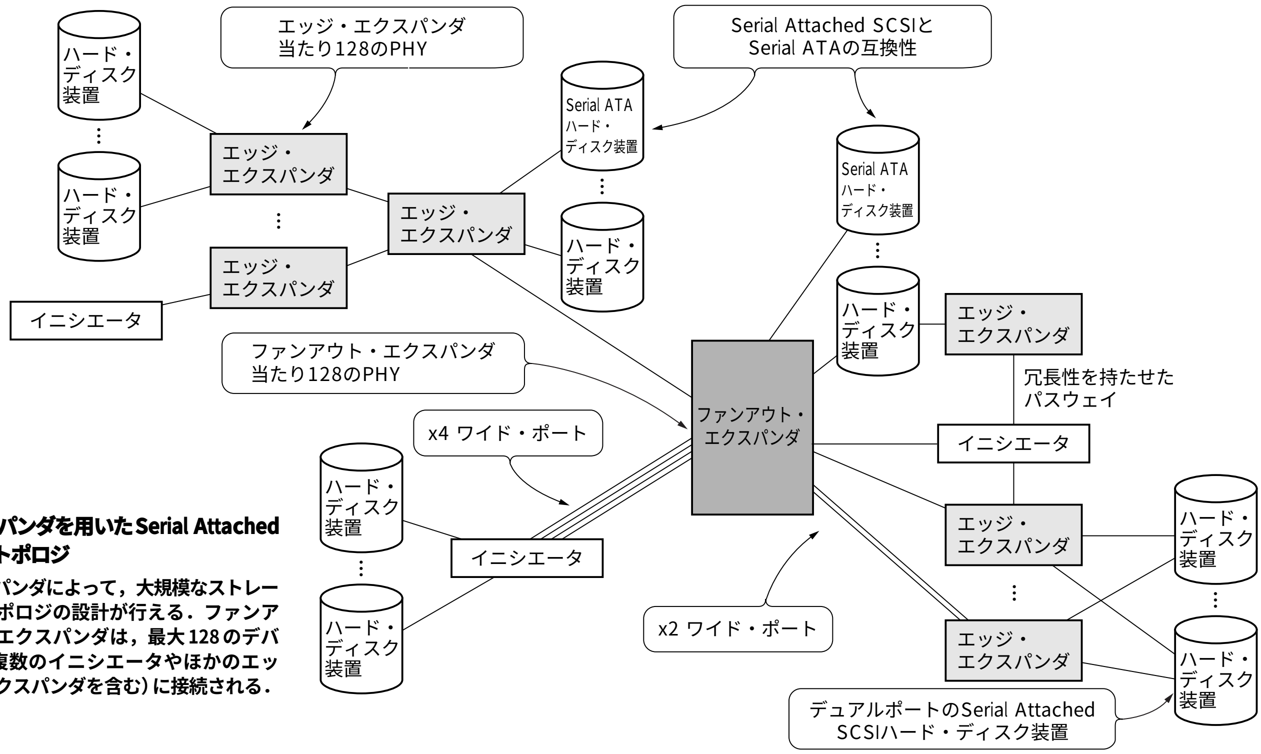


図2
エクスパンダを用いたSerial Attached SCSI トポロジ
エクスパンダによって，大規模なストレージ・トポロジの設計が行える．ファンアウト・エクスパンダは，最大128のデバイス（複数のイニシエータやほかのエッジ・エクスパンダを含む）に接続される．

● ケーブル，コネクタはより小型に

また，大規模で高性能なトポロジを実現するために，ケーブルについても検討されました．Serial Attached SCSIでは，パラレルSCSIで必要だった信号線用の68ピンのリボン・ケーブルと電源用ケーブルが，1本の細い4線（2組の差動信号線ペア）のケーブルに置き換わります．ケーブルを細いシリアル・ケーブルにしたことで，筐体内の空気の流れを改善したり，ホットプラグ接続を容易にするコンパクトな設計ができます．Serial Attached SCSIケーブルの長さは最大8mです．

加えて，Serial Attached SCSIのコネクタ形状は小型であり，これまで3.5インチのFibre Channelハード・ディスク装置にのみ備わっていたデュアルポート接続が，2.5インチのハード・ディスク装置についても適用できるようになりました．このことは，ブレード・サーバのような配置密度の高いサーバにおいてドライブ・スピンドル（ディスク装置）に冗長性を持たせるアプリケーションでは，非常に重要な要素です．

● 互換性があるのでSerial ATAとのシステム構築が容易

また，Serial Attached SCSIインターフェースはSerial ATAと互換性があります（Serial ATAはSerial Attached SCSIと比べてGビット当たりのコストが安い）．つまり，システム開発者はSerial Attached SCSIまたはSerial ATAのハード・ディスク装置を一つのシステムの中で自由に組み合わせることができます．さらに，二つのインターフェースに対応するための部品調達や在庫管理などのコストを大幅に低減できます．

この2種類のデバイスは，通常，別々のアプリケーションで使用されますが，多くの企業ユーザは二つとも必要としているため，こうした特徴は設計者にとってもユーザにとっても非常に大きな利点です．

Serial ATAハード・ディスク装置は，基本的にコスト効果を重要視する際に用いられます．Serial ATAハード・ディスク装置の特徴は，比較的低速のスピンドル速度（一般に7,200rpm）で，信頼性もそれほど高くない（MTBF：mean time between failureが短い）のですが，低コストです．したがって，伝送速度が低く，データの可用性に対する要求がそれほど厳しくないシステムに適用されているようです．

一方，Serial Attached SCSIハード・ディスク装置は，高性能で高可用性が求められるシステムに組み込まれます．Serial Attached SCSIハード・ディスク装置は，データ精度を保証するために回転による振動を補償しながら，比較的高速なスピンドル速度（10,000～15,000rpm）で動作します．また，信頼性が高いのも特徴です．Serial Attached

SCSIハード・ディスク装置は，データ量が大きく，データの可用性が非常に重要視されるシステムで使用されることでしょう．

Serial Attached SCSIの仕様では，バックプレーン・コネクタは二つのポート（Serial ATA用とSerial Attached SCSI用）を備えるよう規定されています．そのため，一つのシステムにSerial ATAまたはSerial Attached SCSIのハード・ディスク装置を追加・交換する際には，単純に装置を置き換えればよいのです．なお，Serial ATAのバックプレーンにはSerial ATAハード・ディスク装置しか接続できません．

● PCI ExpressシステムとSASシステムの違いを知る

新しいシリアル・アーキテクチャであるPCI Expressは，現在および将来のシステムのインターコネクトに対する幅広い要求を実現するために規格化されています．例えば，今後の10GビットEthernetやSerial Attached SCSIに対応できるように，柔軟性や拡張性，高い帯域性能などを備えています．ホットプラグやホットスワップに対応したポイント・ツー・ポイントのアーキテクチャをとるPCI Expressですが，ソフトウェアについては従来のPCIやPCI-Xと互換性があります．

一つのPCI Expressリンク（1レーン）は，二つ（送信側と受信側）の低電圧差動信号ペアで構成されます．また，Serial Attached SCSIと同じように，PCI Expressも8b/10b符号化方式を用いたエンベデッド・クロックを採用しています．これによって，信号品質（シグナル・インテグリティ）を維持しつつ，高速なデータ転送速度を実現します．

1レーン当たりのデータ転送速度は単方向で2.5Gbpsです（実効レートは2Gbps）．x1やx2，x4，x8，x12，x16，x32[注4]のリンクを構成することで，最大128Gbpsのノード間のポイント・ツー・ポイント接続を可能とします．

ワイド・リンク[注5]によるデータ伝送において，PCI ExpressがSerial Attached SCSIと大きく異なる点は，バースト・レート（最大データ転送速度）による広帯域を提供するために，PCI Expressのデータはレーンを束ねたリンクごとに水平方向に分割されることです．このため，かりにあるレーンになんらかのエラーが発生すると，すべてのレーンが機能しなくなります．Serial Attached SCSIの場合，データはリンクごとあるいは一つのワイド・ポートごとに垂直に分割されます．そのため，一つのSerial Attached SCSIのリンクに不ぐあいが生じても，ワイド・ポートの残りのリンクがデータ転送を続けます．

Serial Attached SCSIは，全二重通信のポイント・ツー・ポイント接続というアーキテクチャによって，同時に複数のイニシエータとターゲット・デバイスの間の接続をアクティブ（有効）にすることができます．デバイスは一度に双方向のデータを送信できます．また，先に述べたように，これらの複数のリンクを結合してワイド・ポートを構成できます．そのため，システム設計者は，利用可能な帯域を増やすために，Serial Attached SCSIイニシエータやエクスパンダの性能を一つにまとめることができます．つまり，四つまたは八つのリンクを束ねることで，24Gbpsまたは48Gbpsの帯域を実現できます．

エンド・ツー・エンド接続（終端間接続）のパス（経路）は，データの送信が始まる前に，イニシエータとターゲットの間に生成されなければなりません．そのため，フレーム送信の開始を遅らせる可能性もあります．しかし，ACK（アクノリッジ）をフレームに挿入することで性能を改善できます．帯域を上げるため，Serial Attached SCSIのワイド・ポートは，1リンクの場合と同じようにバースト・レートで複数のI/Oコマンドを並行して送信します．Serial Attached SCSIのワイド・リンクの仕様では，奇数または偶数の任意のリンク幅（例えば，二つ，三つ，四つ，あるいはそれ以上のリンク）を許可しています．Serial Attached SCSIの帯域はリニアに広がりますが，それはそれぞれのリンクをまとめて全二重通信を維持するためです．データはリンク間で分割されることはありません．各リンクは，ターゲット・デバイスに独立して接続される形をとっています．それぞれのリンクにおけるエラーは性能を引き下げますが，ワイド・リンク全体の障害の原因にはなりません．

Serial Attached SCSIと同じように，PCI Expressは一度に双方向のデータ送信を行うことで，1レーン当たり最大5Gbpsのデータ伝送速度を実現しています．レーンを複数束ねればより広い帯域に対応できます．ACKフレームはフレーム間に挿入されますが，これによって次のフレームに遅延が生じます．しかし，一つのACKフレームは複数の受信フレームに対応します．Serial Attached SCSIと

注4：レーンを一つまたは複数束ねたものをリンクと呼ぶ．x1（バイ・ワン）リンクは一つのレーンで，x2リンクは2レーンで，x32は32レーンで構成される．

注5：本稿でワイド・リンクという場合，Serial Attached SCSIについてはワイド・ポートを，PCI Expressについてはx2以上のリンク（複数レーンの構成）を指す．

は異なり，PCI ExpressのI/Oコマンド・データの送信はシリアルで行われており，リンクがつねに接続されているため，スタート時の遅延はありません．

● スループットを最大にするためのバッファ構成

PCI ExpressとSerial Attached SCSIを組み合わせたシステムのスループットを最大にするためのポイントを以下に示します．

- 両者の帯域幅を合わせる
- 両者のリンク，内部バッファ，内部ブリッジにおけるI/Oのボトルネックを低減させる

PCI ExpressとSerial Attached SCSIのリンクはそれぞれ異なるデータ転送速度（ビット・レート）注6に対応しているので，その違いを管理するためにバッファはフレームの最大サイズのペイロード（送信データ部分）を一時的に格納できるようにしておく必要があります．また，インターフェースのフロー制御には，適切なバッファ・サイズを確保することが求められます．

Serial Attached SCSIのSSP（SAS SCSI Protocol）注7用のフレームのペイロード・サイズは最大1,024バイトです．送信時のSerial Attached SCSIリンクでは，通常，少なくとも二つのバッファを使用します．受信時には三つのバッファを使用します．Serial Attached SCSIのすべてのリンクに対応している場合，全バッファが使用状態になります．そのほかにもI/Oの使用状況やホストI/Oの分散・集中，フレーム・ヘッダのビルディング・デコーディングなどの情報を格納するためのバッファが必要となります．

PCI Expressフレームでは，異なる最大ペイロード・サイズを選ぶことができます．しかし，Serial Attached SCSIデバイスとのデータ転送を考えると，バッファ・サイズとPCI Expressのフレーム・サイズはSerial Attached SCSIに合わせる必要があるでしょう．そうすることで，同じフレーム数でそれぞれのリンク間を通信することができます．

対応するPCI Expressのリンク幅（レーン数）やSerial Attached SCSIのポート幅（リンク数）によって，最大帯域幅に必要なバッファ数が規定されます．例えば，PCI Expressがx4リンクの場合，水平方向に4バイト（ここでは，32ビット=1dword：double wordとする）分割された形で転送を行うことになります（**図3**）．フレームを転送するために，それぞれの方向でコンテキスト切り替えが発生します．Serial Attached SCSIの場合，ポート幅に関係なくつねに垂直方向に分割された1dword単位で転送されます．Serial Attached SCSIにおけるコンテキスト切り替えは，Serial Attached SCSIの接続が確立されたときに発生します．Serial Attached SCSIの全二重通信を行っているときは，追加されたコンテキスト切り替えがそれぞれの方向で実行されます．このようにして，帯域の違いにかかわらず，PCI ExpressリンクがSerial Attached SCSIよりも4倍高速にフレームを転送できます．

PCI ExpressリンクからSerial Attached SCSIリンクへのデータ転送については，PCI Expressリンクで最大の帯域幅を得るために，より少ないバッファ数でより高速なフレーム転送が要求されます．PCI ExpressからSerial Attached SCSIへのデータ転送では，Serial Attached SCSIリンク用

注6：PCI Expressはx1リンクで片方向2.5Gbps，Serial Attached SCSIは1リンク当たり3Gbps．
注7：SSPはイニシエータとターゲット・デバイス（終端末）の間のシリアル・リンク上にSCSIプロトコルをマッピングするもの．

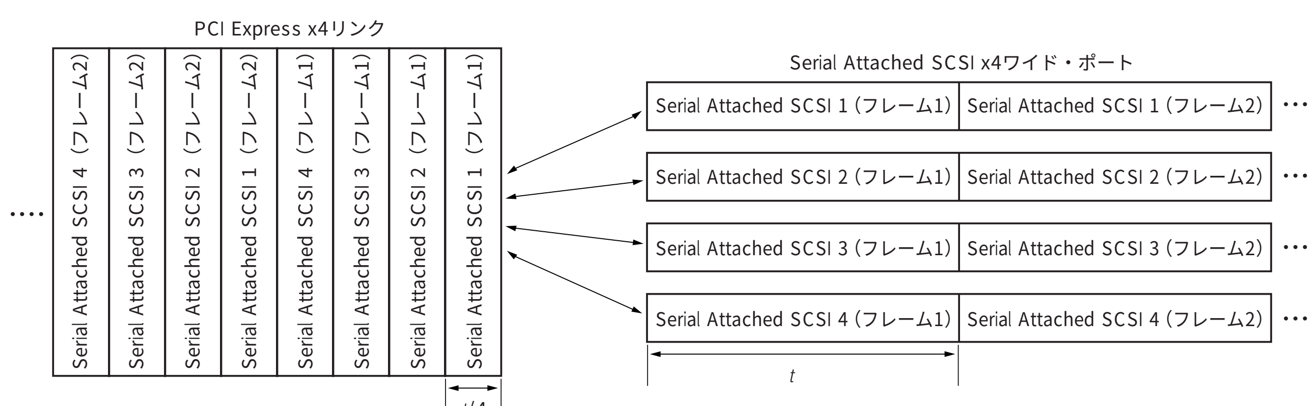


図3　フレーム転送の変換

PCI ExpressとSerial Attached SCSIの間のフレームの変換を示す．データの分割方法の違いによって，PCI ExpressのほうがSerial Attached SCSIよりも4倍高速にフレームを転送できる．

に二つのバッファが必要となります．

一方，逆方向の転送では，目標とする帯域幅に合致するように三つのバッファが必要です．x4のワイド・ポートにおいて，すべてのSerial Attached SCSIリンク（四つのリンク）がPCI Expressにフレームを送信している場合，Serial Attached SCSIリンク（x1で3Gbps）のデータ転送速度は，PCI Expressリンク（x1で2.5Gbps）のデータ転送速度を超えてしまいます．このオーバランを保証するために，複数のバッファを使わなければなりません．より高速なSerial Attached SCSIからのデータで満たされた一つのバッファは，低速なPCI Expressによってそれが空にされるまで利用できません（**図4**）．高速レートにおいて，バック・ツー・バック接続[注8]のフレーム数を最小限にするため，リンクのデータ転送速度の違いや低速リンクにおけるフロー制御の遅延，内部I/O管理の遅延を補償するために十分なバッファを配置します．

ここで，Serial Attached SCSIの一つのPHY用として1,024バイトのバッファを五つ持つデバイスを考えてみましょう．このうち二つのバッファはSerial Attached SCSIリンクへの送信とPCI Expressからの受信に用います．残りの三つのバッファはSerial Attached SCSIからの受信とPCI Expressへの送信に用います．この使用方法は，複数のフレームをバック・ツー・バック接続で転送する場合には，バッファ数を最小にとどめることができます．

Serial Attached SCSIとPCI Expressは，フレーム転送のためにフロー制御を必要とします．一つのフレームを送信するには，送信側は予期した行き先（受信側）からフレームごとにクレジット（送信許可）を受け取る必要があります．クレジットとは，フレームを受け取るためのバッファが利用可能な状況にあるかどうかを知らせるために，受信側から送信側へ送る信号（RRDY）のことです．受信側がフレームを受け取る用意ができていれば送信側はRRDY信号を受信して，フレームを送る許可を得ます．

受信フレームが有効になると，PCI Expressへの転送のためにバッファを利用できるようになります．バッファ内のデータに応じたコマンドやシステム配置がI/O管理によって決定されます．また，PCI Expressのフレーム・クレジットも転送されます．いったんフレーム転送の成功を示すACK DLLP（data link layer packet）が受信されると，PCI Expressフレームの転送に用いられるバッファは別のSerial Attached SCSIフレームを受信するために用いられるようになります．PCI ExpressからSerial Attached SCSIへのバッファ転送も，これと似たような手順で行われます．

PCI Expressインターフェースのリンク幅を変更すると，クロック速度またはバッファの幅が変わります．一方，Serial Attached SCSIインターフェースのリンク幅を変更すると，クロック速度は変わりませんが，バッファが追加されます．水平方向から垂直方向のdword単位の分割に変換したり，データ・ストリーミングや速度調整，リクエストの再送信に対応するため，複数のバッファが使用されます．ここで，次のことをよく覚えておいてください．

- 必要とされるバッファの幅はPCI Expressのレーンの幅（リンク数）に比例する

注8：バック・ツー・バック接続とは，シリアル・インタフェースでルータなどを接続する方法．

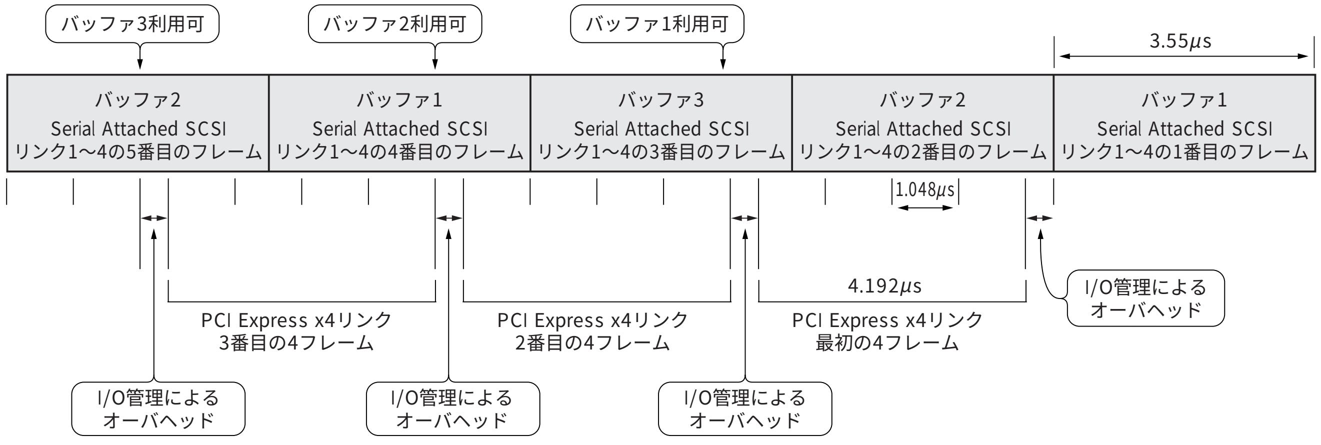


図4　フレーム・バッファの利用

Serial Attached SCSIからのデータで満たされた一つのバッファは，低速なPCI Expressによってそれが空にされるまで利用できない．

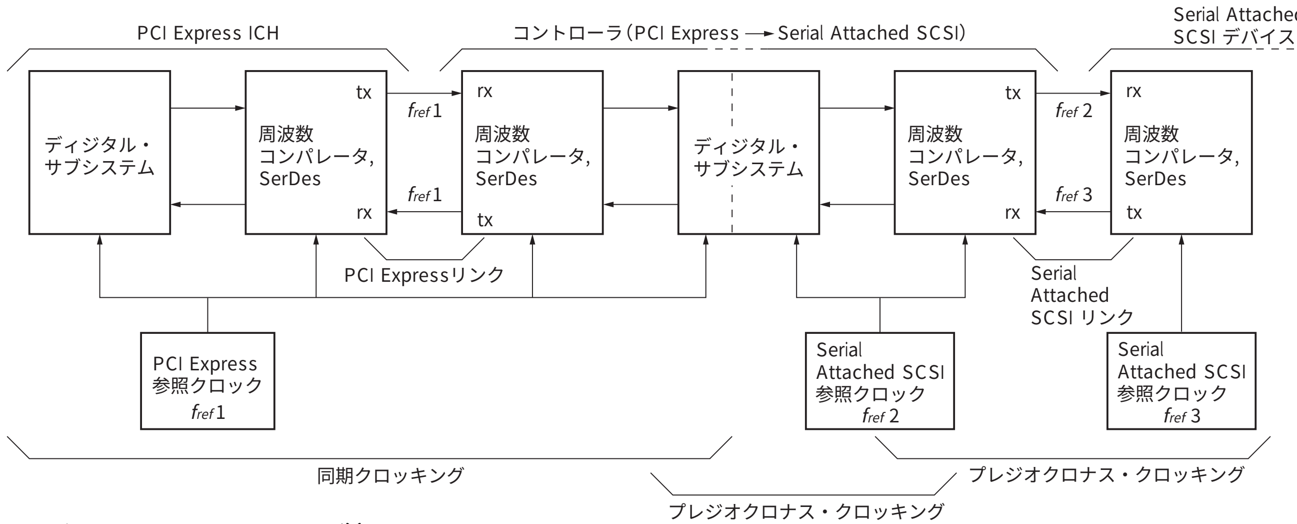


図5　プレジオクロナス・クロッキング(3)

システムのクロック源が異なる場合，プレジオクロナス・クロッキングを用いる．このクロッキング方式は，システム・クロックの周波数の違いをある限られた範囲内で許容することができる．図の場合，PCI Expressのホストと周辺回路の通信には，ホストから供給される同一クロック($f_{ref}1$)を使うことができるので，同期クロッキングになる．このPCI Expressリンクと別の独自のクロック源($f_{ref}2$，$f_{ref}3$)を持つSerial Attached SCSIリンクの間のデータ転送の場合，プレジオクロナス・クロッキングが用いられることになる．

● 使用できるPCI Expressのレーンの幅はPCI Expressのスロット数によって変わる

エラー処理とエラー・リカバリは複雑です．また，その方法によって，必要となるバッファ数とバッファ・サイズが異なります．バッファの再送信において，リカバリ時間を減らし，性能の低化を防ぐことは重要です(ただし，次に来るフレームのACKやNAKがバッファを利用できないために遅延した場合は除く)．PCI ExpressやSerial Attached SCSIのACKとNAKの定義は異なります．また，I/O管理の制御もPCI ExpressとSerial Attached SCSIのどちらのタイプのリンクかによって変わってきます．

● 異なるクロック速度を管理する

PCI Expressはdword単位のクロック・サイクルを持っています．このクロック・サイクルはレーンの幅によって変わりますし，通常，PCI Expressの最大リンク幅の観点から管理されています．例えば，x4のPCI Expressリンク向けのクロック・サイクルは1dword，x8では2dwordとなります．x4のレーン幅では，一定の速度のクロックを保ちながら，すべてのクロックがデータ転送のために使用されます．

一方，Serial Attached SCSIは，リンク幅に関係なく，一定のdword単位のクロック・サイクルを備えています．すべての送信用PHYは同じクロック源を使うことができ，各受信用PHYは受信したビット・ストリームから別のデータ転送速度を生成します(送信ビット・クロックは受信用PHYの参照クロックとしてのみ利用される)．これは，150MHzまたは300MHzのシンボル・レートに相当します．結果として，dword単位のレートは37.5MHzと75MHzとなります．

デュアルポートのバッファは，内部クロックの最小化と管理負荷の軽減のために用いられます．同じクロック源はすべての同期クロックで用いられなければなりません．もしそれが不可能であるならば，順応性のあるバッファを持つプレジオクロナス(plesiochronous)クロッキングを使う必要があります(**図5**)．

● リンクの配置配線に関する注意点

リンクのレイアウトを行う場合，差動スキュー，およびリンクの信号源から目的のレシーバまでの配線のインピーダンスを考慮する必要があります．

ディジタル・ドライバ回路は，プラスまたはマイナスの差動出力へのパスにおいてディジタル要素が多いため，スキューが発生しやすくなっています．また，そのことが差動ドライバのリンク信号に影響を与えます．アナログ・ドライバ回路の設計では，通常，プラスまたはマイナスの差動出力の遅延の低減について，さらに考慮する必要があります．チップのダイからパッケージへの接続については，

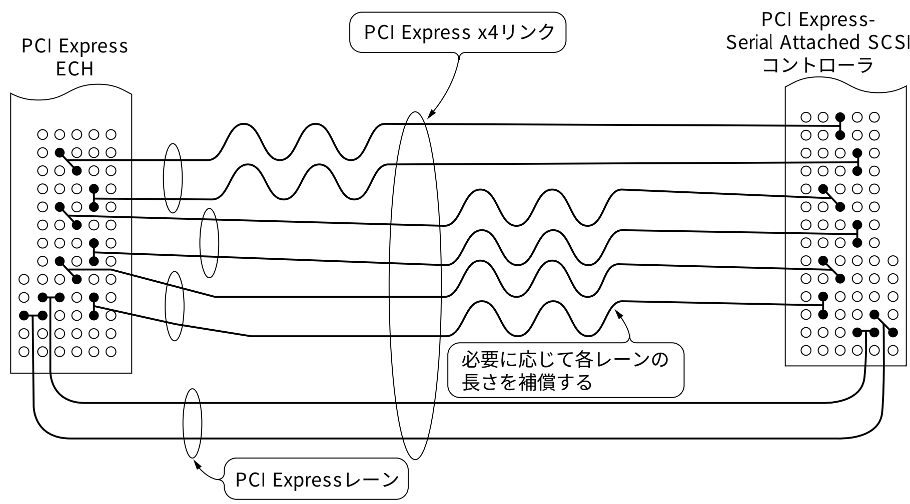


図6
PCI Expressのリンク補償
x4リンクの場合の配線例を示す．ただし，ここではテクニックだけで，実際のレイアウトは示していない．PCI Expressの複数リンクは，いわゆるシリアル-パラレル・バスである．差動信号線ペアのスキューは最小化される．

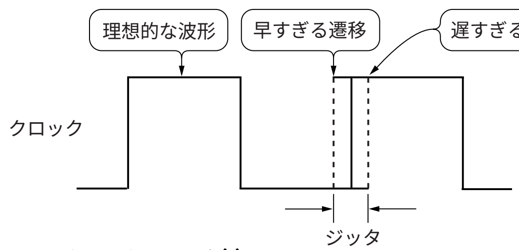


図7　クロック・ジッタ(4)

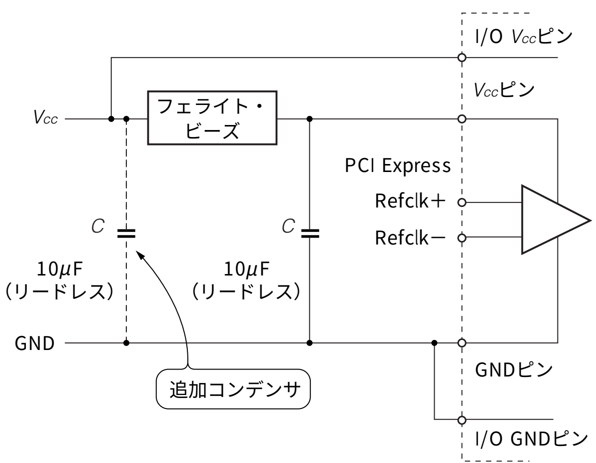


図8　クロック入力ジッタの低減方法(4)
クロック・ジッタは，電源からクロック発生器へのクロック源に関連する外部ノイズによって発生する．また，近傍の別の配線からクロック線へのカップリング・ノイズの影響も受ける．できるだけデバイスに近いクロック線上でこのノイズを除去することが重要．さらに，デバイスのクロック・レシーバには，できるだけ内部のディジタル・ノイズがのっていないきれいな電源とグラウンドを供給するべきである（フィルタを通した外部の電源とグラウンドに直接つなぐ．ほかの回路の電源やグラウンドには接続しない）．

インピーダンスを維持するように制御しなければなりません．ワイヤ・ボンドで接続されている場合はとくに気をつけなければなりません．

パッケージ基板（サブストレート）にはしばしば多層基板を用います．多層基板では，ビアや層間速度の違い，物理的なピン配置などに注意します．デバイスの製造メーカは，プリント基板を最適化するために差動リンクの信号の種類の一覧表をプリント基板設計者に提供する必要があります．

PCI Expressのワイド・リンクに対応したシステムを設計するとき，プリント基板からレシーバへのパスにおいてレーンの長さを補償することができます（**図6**）．

クロストーク・ノイズやグラウンド/電源層の配線など，リンク上の外部からの影響も考慮することが重要です．インピーダンスの変化を防ぐために，層の変更（およびビアの使用）は避ける必要があります．また，リンク・パス上のほかの部品の変更も避けましょう．クロック・ジッタ（**図7**）を減少させることは，最大の性能とPCI Express仕様に合致した公差を得るうえでとてもたいせつです．

差動端部によって発生する差動ジッタは，マイクロストリップ線路よりもストリップ線路を用いることで低減させることができます（**図8**）．

参考＊引用文献

(1) ＊PCI Express Base Specification Revision 1.0a, PCI-SIG, April 15, 2003.
(2) ＊Serial Attached SCSI Specification 1.0, SCSI Trade Association.
(3) Brian Wong ; New techniques re-time data signals for plesiochronous communication, CommsDesign, Nov. 2001.
(4) ＊Grasso and Greb ; Compliance Engineering Magazine, June 2002.

Tim Symons
米国Adaptec社
Systems Architect and Technologist

Linus Wong
同社Strategic Marketing Director